

高级电工培训教材

电 气 测 量

劳动部培训司组织编写

中国劳动出版社

高级电工培训教材

电 气 测 量

劳动部培训司组织编写

中国劳动出版社

(京)新登字 114号

内 容 提 要

本书是根据劳动部培训司审定颁发的高级电工培训《电气测量教学大纲》编写的，是高级技工教育和高级技工培训的统编教材。

本书在中级电工测量知识的基础上，主要讲授部分电量、非电量的测量原理和测量仪器仪表，内容包括：电气测量概述、测量误差、电工测量与仪表、电子测量与仪表、非电量的电测法。

本书可作为维修电工和一般电工进行高级技工教育和培训的教材，以及职工的自学用书，还可供有关技术人员、技师作参考。

本书由梁如福、周俊荣编写，梁如福主编，王存龄、杨传旺审稿，王存龄主审。

本书在编写过程中参考了有关资料和文献，特向作者致谢。

电 气 测 量

劳动部培训司组织编写

责任编辑：张建英

中国劳动出版社出版

(北京市和平里中街12号)

北京地质印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

787×1092毫米 16开本 8.25印张 203千字

1992年3月北京第1版 1992年3月北京第1次印刷

印数：6800册

ISBN 7-5045-0946-9/TM·051 (课) 定价：3.30元

前 言

随着科技进步与经济发展,电气设备使用广泛,特别是自动控制技术的应用推广,一些新型复杂的机电设备日益增多。对这些设备的安装、调试与维修任务越来越大,需要合格的高级电工越来越多。为使培训高级电工的工作逐步规范化,我们会同有关部门和地方组织编写了这套高级电工培训教材。

这套教材的编写是从企业生产实际出发,主要依据《工人技术等级标准》,既考虑到工人的实际技术状况,又适当兼顾今后生产发展的需要,使其不仅满足目前各行业培训高级电工的需要,又为培训对象进一步掌握新知识、新技能奠定基础。本套教材具有工人培训教材的讲求实际、实用、实效的特点。在内容上,努力做到理论与实践紧密结合,操作技能方面以培养工人掌握复杂操作的技能技巧和增强分析、判断、排除各种复杂故障的能力为重点;理论知识方面力求突出针对性、实用性、与技能训练紧密配合。文字叙述尽量做到深入浅出、通俗易懂,可供培训高级电工使用,也可供工人自学使用。

这套教材计有:《电气管理知识》、《微机原理与应用》、《电工基础》、《电子技术》、《电气测量》、《电机原理与维修》、《工厂电气控制技术》、《液压传动》、《工厂变配电技术》、《电气安装技术》、《高级维修电工技能训练》、《高级电工技能训练》等共 12 种。

教材的编写得到了航空航天部、建设部、轻工部、天津市机械局、上海、江苏、湖南、辽宁、河南、山东省(市)劳动厅(局)的支持。

由于高级工人培训教材的编写,目前尚无成熟经验可循,教学思想、教学内容、教学方法的改革都在研究探讨之中,书中存在一些缺点和不足在所难免。恳切希望广大读者提出宝贵意见,以便在适当的时候进行修订,使之更加完善。

劳动部培训司

目 录

第一章 概述	1
§ 1—1 电气测量的特点和方法.....	1
§ 1—2 电气测量仪器仪表的发展.....	2
§ 1—3 误差及其主要来源.....	4
§ 1—4 减弱或消除误差的方法.....	6
§ 1—5 测量结果的数据处理.....	9
第二章 电工仪表与测量	12
§ 2—1 电工仪表的基本知识.....	12
§ 2—2 电压电流的测量.....	15
§ 2—3 电功率、电能、功率因数的测量.....	17
§ 2—4 频率的测量.....	20
§ 2—5 电阻的测量.....	22
§ 2—6 交流电桥.....	25
第三章 电子仪器与测量	32
§ 3—1 信号发生器.....	32
§ 3—2 电子示波器.....	39
§ 3—3 晶体管特性图示仪.....	53
§ 3—4 电力电缆故障测试仪.....	73
§ 3—5 直流数字电压表和繁用表.....	86
第四章 非电量的电测法	96
§ 4—1 概述.....	96
§ 4—2 传感器.....	98
§ 4—3 非电量电测法的应用实例.....	111

第一章 概 述

§ 1—1 电气测量的特点和方法

测量是人们借助于专门设备,对客观事物取得数量概念的认识过程,是人们定量地认识客观事物的十分重要的手段。电气测量是泛指以电磁技术为手段的电工测量和以电子技术为手段的电子测量的电工电子系统的综合测量。用于电气测量的仪器、仪表称为电气仪器仪表。

在现代科学领域中,如果没有统一的测量,人们对于任何事物都将失去量的概念,那是不可思议的。人们对大到天体的认识,小到对中子等微粒的分析研究,都要借助于测量。离开测量便无现代科学。测量技术水平的高低,已成为衡量一个国家科学技术水平高低的重要标志之一。

随着现代科学的不断发展,电气测量的使用日益广泛和普遍。这是因为电气测量技术与其它测量技术相比,有以下明显的特点:

首先是测量对象的广泛性。电气测量既可以测量各种电量(如电流、电压、功率等)和电参量(如电阻、电容、电感等),也可以测量各种非电量(如温度、压力、流量等)。这是因为其它形式的能量都可以转换为电能,所以各种非电量可以转换为电量,然后进行测量。

其次是测量过程的连续性。采用电气测量技术可以对被测量连续进行测量,利用记录仪仪表还可以把被测量随时间的变化记录下来,这样就便于对生产过程的各种状态进行监视。

再次是测量方法的遥测性。电气测量可以借助于各种类型的传感器,对远距离的、人体难以接近的地方(例如工业电炉内的高温部位)或不能达到的目标(如星球)进行测量,即所谓遥测。

一个物理量的测量可以用不同的方法来实现。测量方法的选择,一般与被测量的特性、测量条件以及准确度要求有关。根据获得测量结果的不同方法,一般将测量方法分为以下几类:

一、直接测量

这种测量,其结果可以从测量的实验数据中获得。测量时,可以使用有相应单位刻度的仪表直接读出被测量的大小;也可以使用度量器进行比较而得到被测量的大小。前者称为直读法,后者称为比较法。

1. 直读法 直读法的实质在于根据仪器仪表的读数来判断被测量的大小。对于指针式仪表来说,为了读取被测量,测量仪表按被测量的单位预先刻好分度。用这类仪表测量电压、电流都属于这种测量方法。

2. 比较法 在测量过程中,被测量需要与标准量具作比较的所有测量方法都属于

比较测量法。其特点是量具直接参与测量过程。

根据被测量与标准量（标准量具之值）比较方法的不同，比较法又分以下四种：

差值法 这种方法是从测量仪表直接读出被测量与已知标准量的差值或正比于此差值的量，从而确定被测量的大小。

零值法 这种方法的特点是使其差值导向零，这时被测量与已知标准量相等。零值法的测量精确度决定于标准量的精确度和指零仪的灵敏度。用电桥测量电阻值，用电位差计测量电动势等都属于这一种方法。

替代法 在测量过程中，用已知标准量去替代被测量，使仪表的指示值恢复到原状态，这时被测量等于已知标准量。

重合法 这种方法是将被测量的一系列记号或信号，与已知的标准记号或信号相比较，并观察其重合的情况，在此基础上求出被测量的值。

比较法测量的准确度高，但操作麻烦、设备复杂，常用于精密测量和仪表校验。

二、间接测量

这种测量的结果是在直接测量几个与被测量具有一定函数关系的数值的基础上得到的。例如，当测量导体的电阻率 ρ 时，可通过直接测出电阻 R 、长度 l 、截面积 S 之后，根据公式 $\rho=RS/l$ 间接求出导体的电阻率。当被测量不能直接测量或直接测量很复杂时，或者间接测出的结果比直接测出的更为精确时，多采用间接测量。

三、组合测量

在测量中，使各个被测的未知量以不同的组合形式出现，根据直接测量和间接测量所得的数据，通过解一组联立方程，而求出未知量的大小，这类测量称之为组合测量。

§ 1—2 电气测量仪器仪表的发展

一、发展简况

从1752年世界上第一台电工仪表——测量电荷的仪表问世以来，到现在才二百多年的历史，电工测量和电子测量仪器仪表已发展到相当高的水平。

在本世纪20年代以前就已使用一些电工仪表，进行电压、电流、电阻等电参数的简单测量。由于电工仪表结构简单，体积小，使用方便，所以直到目前还被广泛采用。然而由于电工仪表有灵敏度低，频率范围窄等缺点，因此在许多测试场合受到限制。

20年代后，电子管放大器被广泛采用，因此使仪表的测试灵敏度、内阻、频率范围均有较大提高。但用电子管制作的仪器仪表体积大，笨重，使用不方便。

50年代后，半导体技术得到迅速发展，使制作的晶体管仪器体积、质量均大为减少。但由于多采用指针式，所以测量速度慢，误差较大。因此，晶体管仪器仪表不能满足要求高速和精密测量的场合。

70年代后，由于集成电路的发展，许多数字仪表代替了指针式仪表，使测量速度快而且精确度有很大提高，使用也方便多了。

随着近些年来计算技术的发展和几代电子计算机的广泛应用，使电气测量领域发生了根本的变化，创立了许多新理论，还采用了新技术制成数字式仪器仪表，使电气测量技术呈现出勃勃生机。

二、发展趋势

电气测量技术的发展是与科学技术、生产的发展相互促进、相辅相成的。一方面，科学技术和生产的发展，对电气测量仪器仪表的要求愈来愈高，也为其提供了新原理、新材料、新元件和新工艺，加速了新型现代化仪器仪表的研制和生产；另一方面，每一种新型的、先进的电气测量仪器仪表或测量方法的出现，又反过来大大促进了科学技术和生产的迅速发展。

可以预言，随着科学技术和生产的发展，电气测量技术将日趋完善，走向现代化。就电气测量仪器仪表而言，其发展趋势为：高性能、多功能、集成化、数字化、自动化、智能化。

1. 高性能 近年来各类电气测量仪器仪表的主要性能和技术指标，如测量范围、精确度、灵敏度、稳定性、频带宽度、速度、分辨力等都有很大提高，例如最高频率可测到 15×10^{10} Hz，最大电阻可测到 $10^{18} \Omega$ ，已相当精确和精密了。但是，随着近代无线电电子学的发展，尤其是空间技术、遥感技术、激光技术和微电子技术的发展，势必要求电气测量仪器仪表继续提高其技术性能，朝着高准确度、高灵敏度、高稳定性、高可靠性方向发展。

2. 集成化 电气测量仪器仪表的集成化是六十年代提出的，到 60 年代末、70 年代初得到了飞速的发展，使电气测量仪器仪表的小型轻量化有了不少进步。例如一种手持探头式数字多用表，重量不到 0.2 kg。但是目前电气测量仪器仪表采用集成电路的只占固体电路的一部分，因而电气测量仪器仪表的集成化，尤其是把大规模集成电路逐步地应用到各类仪器中去，仍是今后的发展方向之一。

3. 多功能 电气测量仪器的一机多用的设想是在五十年代提出来的。1953 年就出现了插件式示波器。进入七十年代，插件式结构被多种仪器所采用，而且有很多改进和创新。例如通用计数器通过更换插件后，可以用来测量频率、周期、频率比、时间间隔、电压、电流、相位等多种参数。随着集成电路技术的发展，为满足日益增长的多样性测量的要求，一些本身就具备多种测试功能的装置相继出现，从而为电气测量仪器仪表的多功能化开辟了更加广阔的前景。

4. 数字化 电子测量仪器仪表的数字化优点很多。首先是读数精确、直观、分辨力高、响应速度快，从而提高了测量效率。另外，由于数字仪器便于程序控制和数据处理，这就为与计算机结合实现自动化测量提供了前提条件。所以，电气测量仪器仪表的数字化，其意义不仅限于将逐步代替读数不准确的指针式仪表和游标式读盘，更重要的是为仪器仪表的程序化、自动化提供了先决条件。

5. 自动化 大型自动化测试系统早在 1958 年就开始进行研究，六十年代后期得到迅速发展，现在已达到实用阶段。例如一种自动网络分析系统，采用通用测量程序可测出七种微波元件的二十六个微波参数，全部测量时间只需 20 秒，测量结果可立即由显示器显示出来，同时打印在数据表格上。这种装置还可以修正系统误差，因此不仅精度提高了，效率也提高了。总之，自动化测量的内容十分丰富，涉及的领域也非常广阔。随着各类学科的进步，不难预料，自动化测量系统将会有更大的发展，其性能将日臻完善。

6. 智能化 仪器仪表就其发展过程来说，经历了三个阶段。第一阶段是模拟式仪表；第二阶段是数字式仪表；第三阶段是智能仪表。智能仪器仪表，是随外界条件变化而具有

正确反应能力的仪器仪表，它包括理解、推理、判断、分析等一系列功能，是数值、逻辑与知识的综合分析的结果。当前我国已陆续研制出“智能示波器”“智能电压表”等多种智能仪器。它把微处理机、微计算机与传统的仪器仪表结合起来，能适应被测量的变化，自动补偿、自动选择量程、自动校准、自寻故障、自动进行指标判断、自动进行逻辑操作、定量控制及程序控制等。它打破了仪器仪表的传统观念，成为仪器仪表发展的一个新趋势。

§ 1—3 误差及其主要来源

在实际测量中，由于测量工具不够准确，测量方法不够完善以及各种其它因素的影响，例如测量者感觉器官和识别能力的局限性，被测量与测量单位的比值在多数情况下不可通用性等，都会使测量结果失真。失真的程度，即测得值与其真值之间的差异称为误差。

仪表不同，测量时所产生的误差也不同。仪表的准确度表示了测得值与真值的接近程度。仪表的准确度越高，误差越小。

一切测量结果都具有误差，误差自始至终存在于所有测量过程之中。因此，在进行具体测量时，我们的目标并非使误差为零（这是办不到的），而是设法把误差控制在所规定的范围之内，并通过数学处理来估算误差的大小。

一、测量误差的表达形式

仪器仪表测量误差的表达形式有三种：绝对误差、相对误差和引用误差。

1. 绝对误差 指示值（测得值） A_x 与实际值（真值） A_0 之间的差值称为绝对误差，以 ΔA 表示，即

$$\Delta A = A_x - A_0 \quad (1-1)$$

在实际测量中，除绝对误差外还常用到修正值（又称更正值或校正值），它与绝对误差等值反号。若修正值用 c 表示，则

$$c = -\Delta A = A_0 - A_x \quad (1-2)$$

2. 相对误差 绝对误差 ΔA 与实际值 A_0 之比称为相对误差，以 γ 表示，计算结果用百分数，即

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

由于一般情况下指示值与实际值比较接近，因而当实际值 A_0 难以确定时，可用指示值 A_x 代替，这时的相对误差为：

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_x} \times 100\% \quad (1-4)$$

例1—1 测量实际值为200V的电压时，A电压表的指示值为202V，B电压表的指示值为201V。测量实际值为20V的电压时，C电压表的指示值为19.5V。试分别求它们的绝对误差和相对误差。

解： $\Delta A_A = 202 - 200 = 2(\text{V})$ $\gamma_A = \frac{2}{200} \times 100\% = +1\%$

$$\Delta A_B = 201 - 200 = 1(\text{V}) \quad \gamma_B = \frac{1}{200} \times 100\% = +0.5\%$$

$$\Delta A_C = 19.5 - 20 = -0.5(\text{V}) \quad \gamma_C = \frac{-0.5}{20} \times 100\% = -2.5\%$$

从上述计算可看出，测量同一个量（例如A表和B表），绝对误差愈小测量结果愈准确。如果测量大小不同的量（例如A表和C表），用绝对误差就无法比较测量结果的准确程度，这时就要用相对误差了。相对误差的绝对值愈小，表示测量的准确度愈高。

3. 引用误差（满刻度误差） 指示仪表是用来测量某一量限内的被测量的。这样一来，在仪表的绝对误差一定的情况下，如用它来测量不同大小的被测量时，由于分母（ A_x 或 A_m ）取值不同，其相对误差也在改变，所以同一个仪表就难以用相对误差反映仪表本身的准确程度。这样便提出了引用误差的概念。绝对误差与仪表测量上限之比称为引用误差，以 γ_m 表示（结果用百分数表示），即：

$$\gamma_m = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 A_m 为仪表量程的上限值，也就是满刻度值。引用误差之所以称为满刻度误差，就是这个缘故。

由于引用误差的分母是固定的，故用它来比较测量不同大小被测量之间的精确程度就比较简便了。

二、误差的分类和来源

根据误差性质的不同，测量误差一般分为三类，每一类误差产生的原因各不相同。

1. 系统误差 这种误差是指在同一条件下，多次测量同一量时，误差大小和符号均保持不变，或条件改变时，其误差按某一确定的规律而变化的误差。

系统误差主要由以下因素决定：

(1) 工具误差 所谓工具误差，是指在测量时由于使用的测量仪表、仪器、量具和附件等不准确所引起的基本误差。例如，仪表刻度不准，指针不直，机械平衡不良，零位误差等。

(2) 方法误差 这种误差是由于测量方法不够完善、所依据的理论不够严密所产生的。因此，凡是在测量结果的表达式中没有得到反应，而在实际测量中又起作用的一些因素引起的误差，统称为方法误差。例如，测量设备的绝缘漏电、寄生电动势、接触电阻压降等等，都会产生方法或理论引起的误差。

(3) 环境误差 测量工具偏离了规定工作条件使用时，由于环境的温度、湿度、电源电压、频率、波形、外界电磁场等等因素影响而引起的误差称为环境误差。环境误差不属于基本误差，而是一种附加误差。

(4) 人为误差 由实验操作者的分辨能力、感觉器官的不完善，以及生理变化、反应速度和固有习惯等因素引起的误差，统称为人为误差。例如，估计读数时始终偏大或偏小；记录信号时超前或滞后；由视觉、听觉不完善的操作者，依靠人耳、人眼来判断仪器读数等，均可能造成误判而产生人为误差。

2. 随机误差 随机误差又称为偶然误差，它是指在相同的条件下多次重复测量同一量时，误差的大小和符号均发生变化，其值时大时小，符号时正时负，没有确定的变化规

律，无法控制也不能预知其大小和符号的误差。

随机误差的来源和系统误差相同，所不同的是随机误差的产生是由于各种互不相关的独立因素随机起伏变动而引起的。例如，电磁场的微变、热起伏、大地微震、空气扰动、仪器结构参数的波动，测试人员的感觉器官的生理变化等等，都能产生随机误差。

有时在测量过程中，虽然测量条件没有改变，测量人员也以同样的细心对被测量进行多次重复观测，尽管仪器的灵敏度很高，还会发现每次测得的数据，其最后一位或几位的数值不会完全一样，其原因就是因为有随机误差的存在。

应该指出，在一定条件下，系统误差和随机误差可以相互转换。例如，指示仪表标尺的分度误差，对仪器仪表制造厂来讲，在进行表盘分度时可能画得偏大些或偏小些，属随机误差；而对于使用部门来说，用该表测量的读数，始终大些或小些，这就转化为系统误差了。

3. 粗大误差 明显地歪曲了测量结果的异常误差称为粗大误差。这种误差是由于在测量中操作者的粗心、不正确地操作以及实验条件突变等引起的。例如，使用有毛病的仪器仪表，测量中读错、记错、算错数据等等。含有粗大误差的测量值称为坏值，应该剔除。

§ 1—4 减弱或消除误差的方法

一、消除系统误差的基本方法

消除系统误差没有通用的方法可循，需要针对具体问题采取不同的处理措施。因此，对系统误差的消除，在很大程度上取决于测试人员的经验、学识和技巧。下面仅就人们在测量实践中总结出来的一些方法作一介绍。

1. 从误差来源上来消除系统误差 这是消除系统误差最根本的方法，它要求测试者对测量过程中可能产生系统误差的各种因素进行仔细的分析，并在测量之前从根源上加以消除。例如，为防止仪器之间的相互干扰，应将它们合理布局；又如，若误差是由外界条件变化引起的，则应在外界条件稳定在允许工作状态后，再进行测量。再如，当指针式仪表选择不当而引起较大示值误差时，应重新选择合适的电表（或量程），尽可能使指针接近于满偏转（达满刻度的 $2/3$ 以上），这样可减小示值误差。这种做法，有时也称为“三分之二原则”。

2. 用修正方法消除系统误差 这种方法是预先将由测量工具、测量方法、测量环境和测试人员等等所产生的系统误差，通过实验、检定、理论计算等确定下来，然后取其反符号值作出修正表格、修正曲线、修正公式等进行修正。这样，知道了修正值之后，即可将测量值加上相应的修正值，便得到消除系统误差的测量结果。

例1—2 某电流表的实验检定数据如图 1—1 曲线所示。据此，可作出测量结果的修正表格如表 1—1 所示。

3. 应用测量技术消除系统误差 在实际测量中，可采用一些有效的测量方法，来消除和减少系统误差。常用的方法有以下几种：

(1) 等值替代法 这种测量方法是：先对被测量进行测量，然后用一个适当大小的标准已知量去替代被测量。在保证其它测量条件不变的情况下，改变已知标准量至某数值，

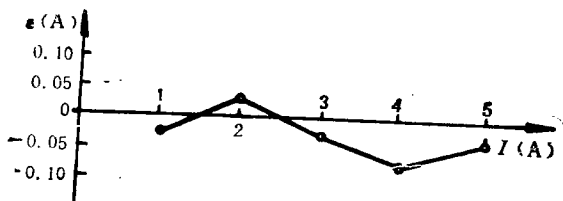


图 1—1 某电流表的实验检定曲线

表 1—1

某电流表的示值修正表

示值(A)	1	2	3	4	5
修正值(A)	0.03	-0.04	0.03	0.08	0.04

使测量仪器仪表恢复到原来状态，于是被测量就等于该标准量。

由于在替代过程中，测量电路及仪器的工作状态、指示器及其它外界条件都保持不变，故在测量中，由仪器内部结构及各种外界因素引起的误差，对测量结果均不起作用，从而消除了由上述因素引起的系统误差。

替代法被广泛地应用在阻抗、频率、衰减量等许多电参数的精密测量之中。

(2) 换位消除法 这种方法是通过交换某两个测量元件，推导出新的计算公式，从而消除产生系统误差的某一因素而达到消除系统误差的目的。

现以等比 ($R_1/R_2=1$) 电桥测量电阻为例，说明换位法的原理。在用等比电桥测量电阻时，若电桥内部的比例臂 R_1/R_2 的比值不准确，不严格为 1 的话，那么将会在测量中引起系统误差，用换位法可消除这一工具误差。测量时先按图 1—2 (a) 线路接线，调 R 至 R' ，使电桥平衡，这时有：

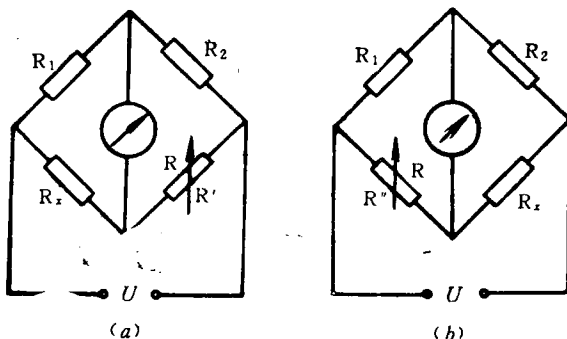


图 1—2 用换位法在电桥上测量电阻

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R'$$

然后将 R_x 与 R 换位 (图 1—2 (b))。这时电桥如果仍然保持平衡，则表明比值 R_1/R_2 等于 1 而无误差。假如此时电桥失衡，则表明 $R_1/R_2 \neq 1$ ，这时可调 R 到 R'' ，使电桥恢复平衡，于是有：

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R'' \quad (1-6)$$

将以上两式相乘、开方得：

$$R_x = \sqrt{R'R''}$$

$$\text{在 } R' \text{ 与 } R'' \text{ 数值接近的条件下: } R_x = \sqrt{R'R''} \approx \frac{1}{2} (R' + R'') \quad (1-7)$$

由于上式中的 R_x 与比值 R_1/R_2 无关，从而消除了由于比值不严格为 1 而引起的误

差。

(3) 正负误差抵消法 这种方法是通过适当地安排实施,使系统误差在测量结果中一次为正,另一次为负。这样,两次测量结果的平均值将与系统误差无关。

例如,用磁电系仪表测量电流或电压,在没有外磁场影响时,仪表的偏转角为 α ;当有某一与仪表的磁场方向一致的恒定外磁场影响时,则仪表的偏转角增加到 $\alpha' = \alpha + \Delta\alpha$,而产生正误差 $\Delta\alpha$ 。为了消除此误差,可将仪表在原来位置上转过 180° ,这时由于外磁场产生相反作用而引起负误差,从而使仪表的偏转角变为 $\alpha'' = \alpha - \Delta\alpha$ 。显然,两次读数的平均值为 α ,这与系统误差无关。

(4) 对称观测法 这种方法采取对称观察测量,能有效地消除按线性规律变化的系统误差。

例如,在用电位差计测量电阻时,推导计算公式时是假定电流 I 保持不变的。但实际上,由于电池的端电压随放电而降低,因而电流也随时间而改变(如图1-3所示)。这就

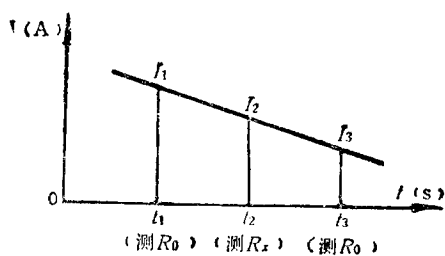


图 1-3 对称观测法例图

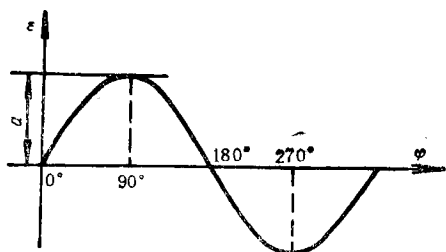


图 1-4 周期性系统误差变化曲线

会引起系统误差。这时如果仍然按公式 $R_x = (U_x/U_0) R_0$ 来确定电阻就不准确了。为此,可采用等时距对称观测法,在 t_1 、 t_2 、 t_3 时刻分别测量电阻值,消除电流变化的影响,从而减小系统误差。

(5) 半周期观测法 对于周期性的系统误差,可采用半周期观测法予以消除。

例如,仪表指针转动中心与刻度盘中心有偏心距 a 时,则指针任一偏转角 φ 所引起的读数误差,即为周期性系统误差,如图1-4所示。当指针在 0° 与 180° 时误差为零;而在 90° 与 270° 时,误差最大且等于 $\pm a$ 。

为消除周期性的系统误差,在第一次读数后,相隔半个周期再取一次读数。由于两次所取读数的误差符号相反,因而平均误差为零,从而消除了这种周期性的系统误差。

二、减少随机误差的方法

一次测量的单个随机误差没有预知的确定规律,但是通过大量的测量实践发现,在多次重复测量的总体上,随机误差都服从统计规律。这种规律之一是:随着测量次数的增多,绝对值相等、符号相反的随机误差,出现的次数趋于相等。特别是当测量次数趋于无穷时,其总体平均值趋近于零。这一性质称为随机误差的抵削性,它是随机误差最重要的统计特性。除此之外,随机误差还具有单峰性和有限性。所谓单峰性,是指绝对值小的误差比绝对值大的误差出现机会多;所谓有限性,是指随机误差的绝对值不会超过一定界限。

由于随机误差有上述特性，因此减少随机误差的方法可以借助于增加重复测量的次数，一般为10~20次即可。如需进一步提高其测量精确度，应选择更为精密可靠的仪表及更加完善的测量方法。

三、粗大误差的防止方法

防止产生粗大误差，首先要求测量工作人员应以高度的工作责任心和严格的科学态度从事测量工作；其次应严格按测量操作程序和操作规程进行测量工作；最后，应对测量结果进行校对，例如由其他人员、或用别的方法、不同的仪器仪表，校对测量数据。

§ 1—5 测量结果的数据处理

一、有效数字的概念

在测量、记录和计算数据时，必须掌握对测量数字的正确取舍方法。不能认为一个数据中小数点后面的位数越多，这个数据就越准确；也不能认为计算测量结果中保留的位数越多，准确度就越高。因为测量所得的结果都是近似值，这些近似值通常都是用有效数字的形式表示的。所谓有效数字，是指从数字左边第一个非零的数字开始，直到右边最后一个数字为止所包含的数字。例如，测得频率为0.0234 MHz，它有2、3、4三位有效数字。在其左边的两个“0”不是有效数字，因为它可以通过单位变换写成23.4 kHz。数字中间的“0”是有效数字，例如电阻30.04Ω，有四位有效数字。至于数字末尾上的“0”，要根据具体情况来分析有效数字的位数。如电阻4800Ω，有四位有效数字，但如写成 $4.8 \times 10^3 \Omega$ ，就只有两位有效数字，它可能是 $4.83 \times 10^3 \Omega$ 或 $4.75 \times 10^3 \Omega$ 经过舍入的数字。所以末位的“0”不可随意增减。

二、有效数字的正确表示

有效数字一般由两部分组成，前几位数字是准确可靠的，称为可靠数字（也称为准确数字），后一位数字通常是在测量读数时估计出来的，称为欠准数字。

1. 有效数字中，只应保留一个欠准数字。因此，在记取测量数据中，只有最后一位有效数字是“欠准数字”。这样记取的数据表明被测量可能在最后一位数字上变化±1个单位。例如，用一只刻度为50分度，量程为50V的电压表测得的电压为41.6V，则该电压是用三位有效数字来表示的，4和1两个数字是可靠的，而6是欠准的。因为它是根据最小刻度估计出来的，它可能被估计为5，也可能被估计为7，所以测量结果也可以表示为 $(41.6 \pm 0.1) \text{V}$ 。

2. 欠准数字中，要特别注意“0”的处理，不能随意增减。例如，测量某电阻的数值为13.600 kΩ，表明前面四个位数1、3、6、0是可靠数字，最后一位数0是欠准数字。如果改写成13.6 kΩ，则表明前面两个数字1、3是可靠数字，最后一个数字6是欠准数字。这两种写法，尽管表示同一数值，但实际上却反映了不同的测量准确度。

3. 如果用10的方幂来表示一个数据，10的方幂前面的数字都是有效数字。例如，电阻 $4.70 \times 10^3 \Omega$ ，则表明它有3位有效数字。

三、有效数字的整理

对于测量或计算获得的数据，必须进行处理。如果只取 n 位有效数字，那末第 $n+1$ 位及其以后的各位数字都应该舍去。如采用传统的“四舍五入”法则，对于 $n+1$ 位是“5”

的数字则都是只入不舍的，这样就会产生较大的累计误差。目前广泛采用的“四舍六入五配偶”法则是：四及四以下的数字舍去；六及六以上的数字进入，当被舍的数字等于5，而5之后有数字时，则可舍5进1；若5之后无数字或为0，而5之前为奇数时，则舍5进1；若5之后无数字或为0，而5之前为偶数时（包括零），则舍5不进位。这里所以采用偶数法则，一方面偶数常能被除尽，可以减少计算上的误差；另一方面按此法则舍入时，当被加数的个数很多时，正负舍入误差出现的机会相等，而在总和中，舍入误差将被抵消。

下面是把有效数字保留到小数点后第二位的几个例子：

$$73.9504 \longrightarrow 73.95 \text{ (四舍)}$$

$$3.22681 \longrightarrow 3.23 \text{ (六入)}$$

$$89.9251 \longrightarrow 89.93 \text{ (舍五进一)}$$

$$617.995 \longrightarrow 618.00 \text{ (舍五进一)}$$

$$523.745 \longrightarrow 523.74 \text{ (舍五不进)}$$

四、有效数字的运算

1. 加减运算 由于参加加减运算的各数据，必为相同单位的同一物理量，所以其精度最差的就是小数点后面有效数字位数最少的，因此，在进行运算前应将各数据所保留的小数点后的位数处理成与精度最差的数据相同，然后再进行运算。

例1—3 求 214.75, 32.945, 0.015, 4.305 四项之和。

解：

$$\begin{array}{r} 214.75 \longrightarrow 214.75 \\ 32.945 \longrightarrow 32.94 \\ 0.015 \longrightarrow 0.02 \\ 4.305 \longrightarrow 4.30 \\ +) \\ \hline 252.01 \end{array}$$

2. 乘除运算 运算前对各数据的处理应以有效数字最少的为标准，所得积或商的有效数字位数应与有效数字位数最少的那个数据相同。

例如求 $0.0121 \times 25.645 \times 1.05782$ 。

其中 0.0121 为三位有效数字，位数最少，所以应对另外两个数据进行处理：

$$25.645 \longrightarrow 25.6$$

$$1.05782 \longrightarrow 1.06$$

所以， $0.0121 \times 25.6 \times 1.06 = 0.3283456 \longrightarrow 0.328$

若有效数字位数最少的数据中，其第一位数是 8 或 9，则其它数据的有效数字应多计一位。例如，上例中 0.0121 改为 0.0921，则另外两个数据应取四位有效数字，即 $25.645 \longrightarrow 25.64$ ， $1.05782 \longrightarrow 1.058$ 。

五、测量结果的数据处理

电气测量结果的数据处理按下列步骤进行：

1. 把测量数据按测量的先后次序列表。

2. 计算出算术平均值。根据最小二乘法原理可知，测量结果的表示以多次测量同一被测量的算术平均值为最可信赖值。测量次数越多，则测量结果的可信赖程度越高。若每

次测量结果用 a_i 表示 $i=1, 2, 3, \dots, n$, n 为测量次数, 那么测量结果的平均值表示式为:

$$\bar{A} = \frac{\sum a_i}{n} \quad (1-8)$$

3. 计算每次测量的绝对误差。把每次测量读数 a_i 与测量结果平均值 \bar{A} 相减得出每次测量的绝对误差, 即

$$\epsilon_i = a_i - \bar{A} \quad (1-9)$$

4. 计算均方根误差。在对一组绝对误差进行分析时, 可排除或减小由系统误差带来的影响。在此基础上这组测量结果的误差按均方根误差计算最为合理, 其表达式为:

$$\delta_r = \sqrt{\frac{\sum \epsilon_i^2}{n}} \quad (1-10)$$

5. 剔除粗大误差。把均方根误差与各个绝对误差进行比较, 剔除超过均方根误差三倍的测量项 (这些项被视为粗大误差), 再重新计算平均值和均方根误差, 直至达到各项绝对误差都小于 $3\delta_r$ 为止。

6. 写出测量结果和测量误差的统一表达式:

$$A = \frac{\sum a_i}{n} \pm \sqrt{\frac{\sum \epsilon_i^2}{n}}$$

习 题 一

1. 简述电气测量的特点。

2. 什么是比较测量法? 它分哪几种?

3. 简述电气测量仪器仪表的发展趋势。

4. 误差有哪几种表示方法? 写出其表达式。

5. 用一只电流表对实际值分别为 1 A、2.5 A 的两电流进行测量, 其指示值分别为 0.98 A 和 2.51 A, 求测量的绝对误差和相对误差。若测量 2.5 A 电流时, 使用电流表的 5 A 档, 求引用误差。

6. 什么是系统误差? 它是怎样产生的? 如何消除?

7. 随机误差有何特性? 如何减小它?

8. 准确度为 0.5 级的电压表, 有 150 V 和 300 V 两个量程。今欲测 110 V 的电压, 问采用哪一个量程为宜? 为什么?

9. 进行有效数字取舍的原则是什么?

10. 进行下列有效数字的运算:

① $113.05 + 47.225 + 0.075 + 373.407$

② $0.056 \times 13.56 \times 1.625 \times 0.835$

11. 如何进行测量结果的数据处理?

12. 测量某线圈的电阻, 9 次测量数据如下 (单位 Ω), 试写出测量结果和测量误差的表达式。

$$a_1 = 24.774 \quad a_2 = 24.778 \quad a_3 = 24.771$$

$$a_4 = 24.780 \quad a_5 = 24.772 \quad a_6 = 24.850$$

$$a_7 = 24.773 \quad a_8 = 24.775 \quad a_9 = 24.777$$

第二章 电工仪表与测量

在中级技术工人的培训中，我们已经学习了一些常用电工仪表的有关知识和操作使用方法。本章先把有关的知识分类进行综合性复习，然后讲述交流万用电桥。

§ 2—1 电工仪表的基本知识

一、电工指示仪表的结构

虽然电工指示仪表的品种很多，但每种仪表都是由测量机构和测量线路两大部分组成的。测量线路的作用是将被测电量转换成测量机构可以接受的过渡电量。例如，测量大电流时，采用分流电路，使通过测量机构的电流变为它可以接受的小电流，测量机构的作用是将这一过渡电量所形成的作用力转换成仪表指针的机械角位移，然后根据指针偏转角的大小，就可以在标度尺上直接读出被测量的数值。

测量机构是电工指示仪表的核心，其结构随着品种规格的不同而有所差异。但是它们存在着共性，任何测量机构都是由驱动装置、制动装置、阻尼装置、指示装置四个主要部分组成。驱动装置产生转动力矩，是测量机构的核心。制动装置产生反作用力矩，使得在每一个被测量值下可动部分都有一个相应的偏转角，而不会偏转到尽头。阻尼装置主要用来平衡可动部分的转动惯量，使指针很快地静止下来。指示装置包括指示器和标度盘，用来直接读数。常用的指示器有指针式和光标式两种。

二、电工指示仪表的分类和原理

电工指示仪表的分类方法很多，可以按作用原理分类，也可以按测量对象分类，还可以按使用方式分类，也有按准确度等级、防护性能、使用条件、电流种类等分类的。这里着重讲一下按作用原理分类的方法。

按指示仪表的作用原理（即转动力矩产生的原理），主要可分以下七类：

1. 磁电系仪表 这是利用可动线圈内电流与固定永磁铁磁场间的作用力而进行工作的仪表。其偏转角 α 与通过线圈的电流成正比，即： $\alpha = cI$ 。

2. 电磁系仪表 是利用动铁芯与固定载流线圈之间，或与被同时磁化了的静铁芯之间的作用力而进行工作的仪表。其偏转角近似地与通过线圈的电流平方成正比，即 $\alpha \approx cI^2$ 。

3. 电动系仪表 是利用可动线圈电流与固定线圈电流之间的作用力而进行工作的仪表。若把固定线圈绕在铁芯上，就构成了铁磁电动系仪表。其指针的偏转角与通过两线圈的电流的乘积成正比，即： $\alpha = cI_1 I_2$ 。

4. 感应系仪表 是利用固定载流线圈的交流磁场与由该磁场在导电的可动部分中所感应的电流之间的作用力而工作的仪表。

5. 静电系仪表 是根据电荷间静电作用力而工作的仪表。